

Rev. FCA UNCuyo. Tomo XLI. N° 2. Año 2009. 73-84.

Modelos digitales de elevación generados por captura directa e indirecta de datos fuente: evaluación de su calidad

Digital elevation models generated by direct and indirect capture systems of source data: accuracy evaluation

Héctor G. Rosatto ¹

Miriam Presutti ²

Guido Botta ^{1,3}

Daniel Laureda ¹

Gustavo Villalba ¹

Luis Rodríguez Plaza, Luis ⁴

Alejandro Atencio ⁴

César Caso ¹

Paula Gamboa ¹

Maia Meyer ¹

Originales: Recepción: 27/11/2008 - Aceptación: 15/10/2009

RESUMEN

La información básica sobre el relieve de una cuenca hidrográfica, mediante metodologías analítico-descriptivas, permite a quienes evalúan proyectos relacionados con el uso de los recursos naturales, tales como el manejo integrado de cuencas, estudios sobre impacto ambiental, degradación de suelos, deforestación, conservación de los recursos hídricos, entre otros, contar para su análisis con los parámetros físicos necesarios. Estos procesos mencionados tienen un fuerte componente espacial y el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) son de suma utilidad, siendo los Modelos Digitales de Elevación (DEM) y sus derivados un componente relevante de esta base de datos. Los productos derivados de estos modelos, como pendiente, orientación o curvatura, resultarán tan precisos como el DEM usado para derivarlos. Por otra parte, es fundamental maximizar la habilidad del modelo para representar las variaciones del terreno; para ello se debe seleccionar una adecuada resolución (grilla) de acuerdo con los datos disponibles para su generación. En este trabajo se evalúa la calidad altimétrica de seis DEMs generados a partir de dos sistemas diferentes de captura de datos fuente y de distintas

ABSTRACT

Analytical and descriptive methodologies yield basic information on the relief of a watershed, and thereby make it possible to determine the physical parameters needed to analyze projects involving natural resources, such as the comprehensive management of watersheds, environmental impact studies, and studies of soil degradation, deforestation, and the conservation of water resources, among others. All of these have an important spatial component which makes the use of Geographic Information Systems (GIS) extremely helpful. Digital Elevation Models (DEM) and their derivatives constitute a relevant part of this source of data. The products derived from these models, like slope, direction or curvature, will be as precise as the DEM used to derive them. Other way, is fundamental to maximize the ability of the model to represent land variations; for it, is necessary a correct grid size selection, according to the available data for its generation. In this work the topographical quality of six DEMs generated from two different capture systems of source data and different grid size. To determinate the accuracy of DEMs, habitually is used a group of control points considered like "field truth" which are compared with the generated by the model in the same geographic

1 Dpto. de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra. Facultad de Agronomía. Av. San Martín 4453. Buenos Aires. Argentina. C1417DSE. rosatto@agro.uba.ar

2 Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Avda. 60 y 119. s/n. (1900) La Plata. Buenos Aires. Argentina.

3 Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de La Pampa. Ruta 35. km 334. (6300) Santa Rosa. La Pampa. Argentina.

4 Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Alte. Brown 500. Chacras de Coria. Mendoza. Argentina. M5527AHB.

resoluciones de grilla. Para determinar la exactitud de los DEMs habitualmente se utiliza un grupo de puntos de control considerados como "verdad de campo" que se comparan con los generados por el modelo en la misma posición geográfica. El área seleccionada para realizar el estudio está ubicada en la localidad de Arrecifes, provincia de Buenos Aires (Argentina) y tiene una superficie de aproximadamente 120 ha. Los resultados obtenidos para los dos algoritmos y para los tres tamaños de grilla analizados presentaron los siguientes resultados: el algoritmo *DEM from contour*, un RMSE (Root Mean Squared Error) de $\pm 0,11$ m (para grilla de 1 m), $\pm 0,11$ m (para grilla de 5 m) y de $\pm 0,15$ m (para grilla de 10 m). Para el algoritmo *DEM from vector/points*, un RMSE de $\pm 0,09$ m (para grilla de 1 m), $\pm 0,11$ m (para grilla de 5 m) y de $\pm 0,11$ m (para grilla de 10 m). Los resultados permiten concluir que el DEM generado a partir de puntos acotados del terreno como datos fuente y con el menor tamaño de grilla es el único que satisface los valores enumerados en la bibliografía, tanto nacional como internacional, lo que lo hace apto para proyectos relacionados con recursos naturales a nivel de ecotopo (predial). El resto de los DEMs generados presentan un RMSE que permite asegurar su aptitud para la evaluación de proyectos relacionados con el uso de los recursos naturales a nivel de unidad de paisaje (conjunto de ecotopos).

position. The selected area to apply the study, is located at Arrecifes locality, in Buenos Aires province (Argentina), and have a surface of approximately 297 acres. The obtained results for both algorithms and three size grid analyzed, have presented these results: the algorithm *DEM from contour*, a RMSE of ± 0.11 m (grid size of 1 m), ± 0.11 m (grid size of 5 m) and ± 0.15 m (grid size of 10 m). The algorithm *DEM from vector/points*, a RMSE of ± 0.09 m (grid size of 1 m), ± 0.11 m (grid size of 5 m) and of ± 0.11 m (grid size of 10 m). The results allow to conclude that only the DEM generated from field heights points like source data with the small grid size satisfies the standards mentioned in the national and international bibliography. So, it appear as apt for natural resources projects, concerning to the ecotopo (predial scale). The rest of the generated DEMs, display a RMSE that allows to assure their aptitude for the evaluation of natural resources projects, concerning landscape unit (group of ecotopos).

Palabras clave

escala de campo • DEM • algoritmo • precisión vertical • RMSE

Keywords

field scale • DEM • algorithm • vertical accuracy • RMSE

INTRODUCCIÓN

La información básica sobre el relieve de una cuenca hidrográfica, mediante metodologías analítico-descriptivas, permite a quienes evalúan proyectos relacionados con el uso de los recursos naturales, tales como el manejo integrado de cuencas, estudios sobre impacto ambiental, degradación de suelos, deforestación, conservación de los recursos hídricos, entre otros, contar para su análisis con los parámetros físicos necesarios. Estos procesos mencionados tienen un fuerte componente espacial y el empleo de Sistemas de Información Geográfica es de suma utilidad, siendo los Modelos Digitales de Elevación y sus derivados un componente relevante de esta base de datos (15).

Euillades *et al.* (3) definen como Modelo Digital de Elevación (DEM) una grilla regular georreferenciada donde a cada celda le corresponde un valor de cota. Estos modelos son muy utilizados en el denominado "entorno GIS".

Torres Nieto y Villate Bonilla (19) definen el Sistema de Información Geográfica (GIS) como el conjunto de métodos y herramientas que actúan coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar información geográfica con sus correspondientes atributos, con el fin de satisfacer múltiples propósitos. En la definición se encuentra presente el componente espacial.

Históricamente, los modelos digitales de elevaciones se han dividido básicamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y raster. En el modelo vectorial los atributos del terreno se representan mediante puntos acotados, líneas o polígonos. En el modelo raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada (4). Dentro de estos dos modelos básicos son posibles diversas variantes de organización de la información, denominadas estructuras de datos.

En la evaluación de la calidad de los modelos de elevación se utiliza un grupo de puntos de control considerados como "verdad de campo", los cuales son comparados con los generados por el modelo en esa misma posición; se obtiene, entonces, la diferencia entre las dos alturas, es decir, el error. Con estos errores se computan valores estadísticos como el RMSE (Root Mean Squared Error) que son usados en la evaluación de la exactitud de los DEMs.

Los usuarios finales de los modelos digitales son los que deciden si el error contenido en un DEM es adecuado o no para la aplicación deseada; por ejemplo: si se deseara evaluar el riesgo de inundación en una zona determinada probablemente se requerirá mayor precisión en el modelo que si se está evaluando riesgo de incendio. Por esta razón es necesario conocer dichos errores para los distintos algoritmos evaluados y las distintas resoluciones utilizadas.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar una metodología para la evaluación de la calidad de los DEMs generados a partir de curvas de nivel y de puntos acotados del terreno. Se compararon los modelos construidos utilizando el programa PCI OrthoEngine V 8.2.0. Los modelos se generaron en tres resoluciones diferentes.

Se evaluó el error atributivo, es decir, cuánto se aleja la altura estimada por el modelo de la altura real. La calidad del modelo se determinó mediante la cuantificación de estos errores. Por consiguiente en este trabajo se calcularon:

- Los errores producidos cuando las alturas son obtenidas desde DEMs generados por curvas de nivel digitalizadas y cuando lo son desde DEMs generados a partir de puntos acotados.
- Las diferencias en los resultados producidos por diferentes tamaños de grilla para cada caso de los algoritmos utilizados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se llevó a cabo en un establecimiento de la localidad de Arrecifes, provincia de Buenos Aires. La zona de estudio está ubicada al Sur-Oeste de la Ruta Nacional 8 a 40 km de la misma (aprox. a 34°24' S - 60°15' O). El sector de estudio se encuentra limitado al oeste y sur por caminos vecinales, al este con un establecimiento vecino y al norte con un camino interno del campo. El área de estudio cuenta con una superficie aproximada de 120 ha.

Metodología

Se desarrolló en tres etapas.

1^{ra} etapa: Captura de los datos con que se generaron los DEMs. Se utilizaron dos metodologías: una directa de captura de datos fuente y otra indirecta

Metodología directa

Se realizó un relevamiento planialtimétrico simultáneo del terreno objeto del estudio. El relevamiento consistió en la ubicación de puntos a partir de estaciones, se llevó a cabo mediante coordenadas polares efectuadas por radiación y su cota (z) a través de nivelación trigonométrica. Esta metodología consiste en el relevamiento de puntos del terreno a partir de estaciones taquimétricas, realizadas en este caso, con una estación total electrónica Pentax PCS-215 de 5" de precisión angular en ambos círculos y una colectora de datos automática Hewlett-Packard 48GX con software de procesamiento y bajada de datos diseñado y provisto por la firma Runco S. A. Las estaciones fueron vinculadas altimétricamente por nivelación geométrica de tercer orden (7).

Para que los datos del levantamiento correlacionen con la realidad del terreno se relevaron a campo los cambios de pendiente, bajos, dorsales, hoyas, mogotes, vaguadas y divisorias de agua (14).

Como resultado de esta etapa se generó la unidad básica de información consistente en un archivo con la totalidad de los puntos relevados. Se ordenaron en una planilla de cálculo estableciéndose tres columnas, una para cada coordenada x, y, z (formato xls).

Metodología indirecta

Se realizó una digitalización de la documentación analógica existente (plano con curvas de nivel del predio con equidistancia de 0,50 m), en forma manual, para lo cual se utilizó la metodología de digitalización propuesta por Solari *et al.* (18), denominada "digitalización en pantalla". Para la digitalización de las curvas se fijó una distancia mínima entre puntos distintos a ser digitalizados de 2,5 m, que corresponden a 0,5 mm sobre el mapa, basándose en los National Map Accuracy Standards (1), que especifican que al menos el 90% de los puntos bien definidos en un mapa a la escala 1:5.000 tienen que ser determinados con una precisión mayor de 0,5 mm (16). Como resultado de esta etapa se generó la unidad básica de información consistente en un archivo de la totalidad de las curvas de nivel del área de estudio, con la extensión .dxf (formato de intercambio con el software que se utilizó en la generación de los DEMs).

2^{da} etapa: Generación de los DEMs

Según Martínez Marín *et al.* (9), los modelos digitales de elevación, de acuerdo con la metodología y el algoritmo de interpolación en la que están basados, pueden clasificarse de distinta forma. Aquí se utilizaron secciones de malla regular o rejilla y curvas de nivel o "strings".

Un DEM debe ser un banco de pruebas. En este modelo están sintetizados todos aquellos elementos que tienen una incidencia representativa en el medio, pero si éste es muy riguroso, los requerimientos de almacenamiento de información y los procesos de análisis se ven seriamente comprometidos. En el otro extremo, una interpretación de la realidad demasiado somera y relajada puede pasar por alto distintos aspectos que sean trascendentes (10).

En función de lo expuesto también se eligieron tres tamaños de grilla (1, 5 y 10 m, compatibles con DEMs a nivel de predio), a fin de evaluar el tamaño de grilla que cumpliera con la condición de tener una alta calidad altimétrica y un "tamaño de archivo" que permitiera su utilización sin grandes requerimientos de almacenamiento o procesamiento.

3^{ra} etapa: Determinación de la calidad altimétrica de los DEMs generados

En la evaluación de la exactitud de los modelos de elevación se utiliza un grupo de puntos de control considerados como "verdad de campo", los cuales son comparados con los generados por el modelo en esa misma posición; se obtiene, entonces, la diferencia entre las dos alturas, es decir, el error. Con estos errores se computa el RMSE (Root Mean Squared Error) que es usado en la evaluación de la exactitud de los DEMs.

En la obtención de estos puntos de control en orden de preferencia se encuentran primero aquellos determinados a campo (20).

En cuanto a la cantidad y distribución de los puntos de control, el United States Geological Survey (USGS) (20) recomienda un mínimo de veintiocho puntos: veinte internos y ocho en los bordes del DEM evaluado.

Estos puntos de control (dada la calidad altimétrica y planimétrica de los mismos respecto del material analizado), se consideran "verdaderos" y sin error.

Se determinaron a campo veintiocho puntos de control, de acuerdo con lo recomendado por el USGS, con nivel de antejo de tercer orden a partir de una poligonal o itinerario de nivelación compensado y con precisión de cada punto al centímetro.

RESULTADOS

Como resultado de las tres etapas enumeradas precedentemente se generaron seis DEMs con dos algoritmos distintos: tres a partir de los puntos acotados a campo y tres a partir de las curvas de nivel digitalizadas. Ambos algoritmos se probaron para tres tamaños de grilla: 1, 5 y 10 m, tamaños de grilla compatibles con modelos a nivel de predio. A modo de ejemplo se muestra la figura 1 (pág. 78), en la cual se aprecia uno de los modelos generados al que se le han anexado para una mejor visualización las curvas de nivel y la distribución de los puntos testigo. La figura 2 (pág. 78) muestra una imagen ortométrica del modelo de la figura 1.

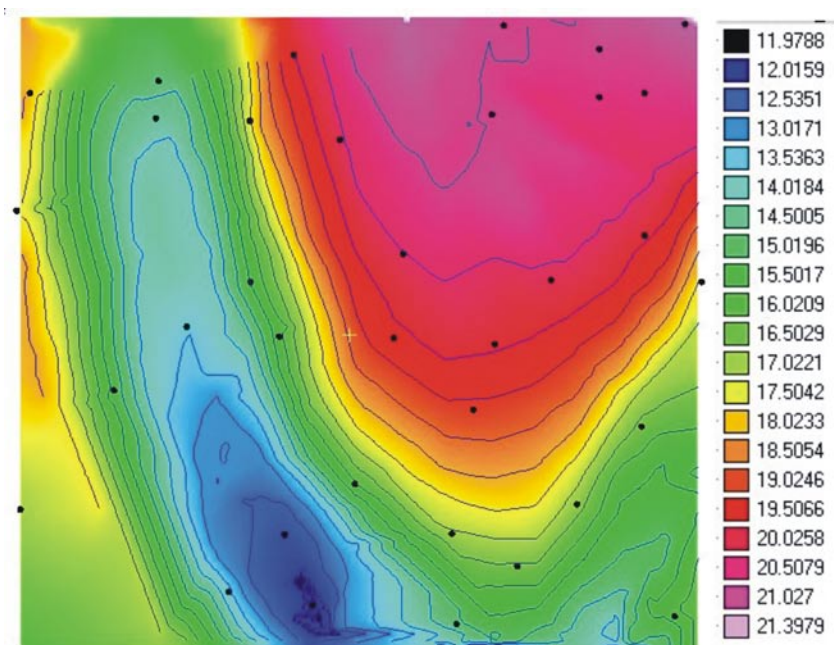


Figura 1. Ejemplo de DEM generado con curvas de nivel superpuestas.
Figure 1. Example of DEM generated with overlapped contour level.

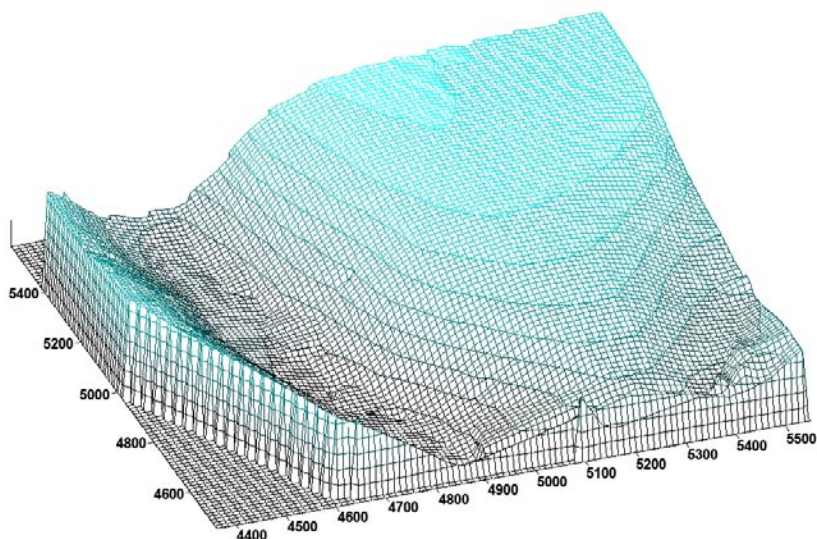


Figura 2. Imagen ortométrica de la figura 1.
Figure 2. Orthometric picture of figure 1.

DISCUSIÓN

La cuantificación del error en un DEM se lleva a cabo comparando un conjunto de valores reales de elevación con los estimados en el modelo, así el error de altitud en un punto d (i) es definido como la diferencia entre la altitud del punto en el modelo z (i) y su valor real z' (i) (4).

La medida más ampliamente utilizada (8, 20, 21) para reportar la exactitud en un DEM es una medida de dispersión: el RMSE (Root Mean Square Error). Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_j)^2}{N}}$$

donde: y_i es el valor de altura del modelo
(1) y_j es la altura real y N es el número de valores modelados.

Se determinó el RMSE para cada uno de los seis DEMs generados, a partir de los puntos de control o "testigos" relevados a campo (ver tablas 1 y 2).

Tabla 1. Determinación del RMSE de los DEMs originados en "Strings".

Table 1. RMSE determination of DEMs "Strings" originated.

Testigos				Z (DEM_PCI) Curvas			Error Verdadero (Z testigo - Z DEM) Curvas			Cuadrado de los Errores		
PV	X	Y	Z	1 m	5 m	10 m	1 m	5 m	10 m	1 m	5 m	10 m
1	5120,97	4507,64	15,22	15,24	15,24	15,32	-0,02	-0,02	-0,10	0,0004	0,0005	0,0097
2	4840,56	5488,36	19,98	19,98	20,00	20,00	0,00	-0,02	-0,02	0,0000	0,0005	0,0005
3	4607,72	5442,85	15,22	15,18	15,24	15,26	0,04	-0,02	-0,04	0,0019	0,0005	0,0013
4	4385,82	5421,93	18,36	18,30	18,27	18,27	0,06	0,09	0,09	0,0035	0,0079	0,0078
5	5496,82	4520,96	16,61	16,19	16,21	16,03	0,42	0,40	0,58	0,1747	0,1638	0,3333
6	4603,05	5378,84	14,69	14,77	14,80	14,84	-0,08	-0,11	-0,15	0,0059	0,0131	0,0227
7	4531,07	4909,90	15,75	15,84	15,78	15,78	-0,09	-0,03	-0,03	0,0084	0,0010	0,0009
8	4727,84	4562,78	14,18	14,13	14,15	14,01	0,05	0,03	0,17	0,0030	0,0007	0,0274
9	4872,94	4540,43	12,40	12,49	12,51	12,50	-0,09	-0,11	-0,10	0,0085	0,0131	0,0108
10	4656,18	5019,57	14,00	14,14	14,17	14,20	-0,14	-0,17	-0,20	0,0188	0,0296	0,0417
11	4764,87	5374,03	17,85	17,88	17,79	17,97	-0,03	0,06	-0,12	0,0010	0,0031	0,0137
12	4765,98	5096,56	16,00	16,00	16,01	15,99	0,00	-0,01	0,01	0,0000	0,0001	0,0002
13	4814,99	5003,47	16,27	16,29	16,21	16,22	-0,01	0,07	0,06	0,0001	0,0053	0,0037
14	4946,22	4748,77	16,50	16,43	16,49	16,23	0,07	0,01	0,27	0,0045	0,0001	0,0755
15	4824,60	4662,43	12,80	12,80	12,88	12,92	0,00	-0,08	-0,12	0,0000	0,0064	0,0152
16	5112,94	4662,86	17,40	17,35	17,35	17,27	0,05	0,05	0,13	0,0021	0,0025	0,0170
17	5225,76	4607,14	16,95	16,95	16,95	16,98	0,00	0,00	-0,03	0,0000	0,0000	0,0010
18	5329,01	4713,52	17,25	17,21	17,22	17,18	0,04	0,03	0,07	0,0016	0,0009	0,0055
19	5440,10	4847,71	16,95	16,90	16,93	16,90	0,05	0,02	0,05	0,0024	0,0006	0,0023
20	5012,96	4999,77	19,85	19,79	19,76	19,75	0,06	0,09	0,10	0,0039	0,0083	0,0091
21	5274,29	5099,60	20,43	20,35	20,34	20,34	0,08	0,09	0,09	0,0065	0,0074	0,0080
22	5444,74	5177,41	20,05	20,09	20,10	20,08	-0,04	-0,05	-0,03	0,0018	0,0022	0,0011
23	5366,68	5415,49	20,82	20,60	20,67	20,74	0,23	0,15	0,08	0,0506	0,0230	0,0070
24	5444,85	5422,14	20,73	20,84	20,84	20,83	-0,11	-0,11	-0,10	0,0119	0,0113	0,0100
25	5367,08	5497,64	20,84	20,94	20,95	20,98	-0,10	-0,11	-0,14	0,0109	0,0127	0,0206
26	4920,01	5342,27	20,33	20,39	20,36	20,42	-0,06	-0,03	-0,09	0,0030	0,0009	0,0079
27	5027,99	5144,91	20,48	20,47	20,44	20,48	0,01	0,04	0,00	0,0001	0,0017	0,0000
27	5187,16	4989,93	20,08	20,05	20,04	20,05	0,03	0,04	0,03	0,0011	0,0014	0,0007
Sumatoria del cuadrado de los errores										0,33	0,32	0,66
Número de muestras										27	27	27
RMSE (metros)										0,11	0,11	0,15

Tabla 2. Determinación del RMSE de los DEMs originados en "puntos acotados".
Table 2. RMSE determination of DEMs "level points" originated.

Testigos				Z (DEM_PCI) Puntos Acotados			Error Verdadero (Z testigo - Z DEM) Puntos Acotados			Cuadrado de los Errores		
PV	X	Y	Z	1 m	5 m	10 m	1 m	5 m	10 m	1 m	5 m	10 m
1	5120,97	4507,64	15,22	15,15	15,16	15,09	0,07	0,06	0,13	0,0044	0,0033	0,0179
2	4840,56	5488,36	19,98	19,99	20,00	19,99	-0,01	-0,02	-0,01	0,0001	0,0004	0,0001
3	4607,72	5442,85	15,22	15,22	15,21	15,17	0,00	0,01	0,05	0,0000	0,0001	0,0030
4	4385,82	5421,93	18,36	18,10	18,12	18,05	0,26	0,24	0,31	0,0652	0,0564	0,0938
5	5496,82	4520,96	16,61	16,27	16,23	16,37	0,34	0,38	0,24	0,1165	0,1478	0,0589
6	4603,05	5378,84	14,69	14,70	14,69	14,64	-0,01	0,00	0,05	0,0002	0,0000	0,0023
7	4531,07	4909,90	15,75	15,74	15,66	15,67	0,01	0,09	0,08	0,0001	0,0084	0,0058
8	4727,84	4562,78	14,18	14,11	14,02	13,99	0,07	0,16	0,19	0,0045	0,0243	0,0344
9	4872,94	4540,43	12,40	12,40	12,40	12,39	0,00	0,00	0,01	0,0000	0,0000	0,0001
10	4656,18	5019,57	14,00	14,01	14,01	14,06	-0,01	-0,01	-0,06	0,0000	0,0001	0,0032
11	4764,87	5374,03	17,85	17,90	18,00	17,90	-0,05	-0,15	-0,05	0,0022	0,0234	0,0024
12	4765,98	5096,56	16,00	16,03	16,07	16,16	-0,03	-0,07	-0,16	0,0007	0,0047	0,0261
13	4814,99	5003,47	16,27	16,29	16,38	16,30	-0,01	-0,10	-0,02	0,0001	0,0106	0,0004
14	4946,22	4748,77	16,50	16,47	16,44	16,41	0,03	0,06	0,09	0,0010	0,0031	0,0079
15	4824,60	4662,43	12,80	12,81	12,80	12,79	-0,01	0,00	0,01	0,0000	0,0000	0,0001
16	5112,94	4662,86	17,40	17,42	17,40	17,37	-0,02	0,00	0,03	0,0003	0,0000	0,0006
17	5225,76	4607,14	16,95	16,92	16,93	16,83	0,02	0,02	0,12	0,0004	0,0004	0,0134
18	5329,01	4713,52	17,25	17,22	17,14	17,08	0,03	0,11	0,17	0,0008	0,0114	0,0302
19	5440,10	4847,71	16,95	16,91	16,87	16,78	0,04	0,08	0,17	0,0019	0,0061	0,0276
20	5012,96	4999,77	19,85	19,80	19,79	19,82	0,05	0,06	0,03	0,0021	0,0039	0,0008
21	5274,29	5099,60	20,43	20,42	20,40	20,42	0,01	0,03	0,02	0,0002	0,0008	0,0002
22	5444,74	5177,41	20,05	20,08	20,06	20,04	-0,03	-0,01	0,01	0,0011	0,0002	0,0002
23	5366,68	5415,49	20,82	20,80	20,80	20,78	0,02	0,02	0,04	0,0004	0,0005	0,0013
24	5444,85	5422,14	20,73	20,73	20,73	20,73	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
25	5367,08	5497,64	20,84	20,83	20,83	20,80	0,01	0,01	0,04	0,0001	0,0002	0,0014
26	4920,01	5342,27	20,33	20,38	20,41	20,43	-0,05	-0,08	-0,10	0,0022	0,0065	0,0103
27	5027,99	5144,91	20,48	20,48	20,48	20,48	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
27	5187,16	4989,93	20,08	20,05	20,04	20,04	0,03	0,04	0,04	0,0007	0,0014	0,0014
Sumatoria del cuadrado de los errores										0,21	0,31	0,34
Número de muestras										27	27	27
RMSE (metros)										0,09	0,11	0,11

Basado en el RMSE, Schiewe (17) propone una clasificación de los DEMs según el grado de exactitud en la determinación de la altura, clasificando los modelos como de muy alta exactitud cuando su RMSE es menor a 0,10 m y como de alta exactitud cuando el RMSE se encuentra entre 0,1 y 1,0 m.

Agrupando los RMSE obtenidos para cada algoritmo por separado según el tamaño de celda analizado, se tienen los datos que se consignan en la tabla 3.

Tabla 3. Resumen de los RMSE calculados.

Table 3. Summary of calculated RMSE.

Algoritmo	Resolución (m)		
	1	5	10
DEM from contour	± 0,11	± 0,11	± 0,15
DEM from vectors/points	± 0,09	± 0,11	± 0,11

De los resultados expuestos se observa que el RMSE (curvas de nivel) obtenido con el algoritmo *DEM from contour* (PCI OrthoEngine V 8.2.0) arroja valores superiores a los obtenidos con el algoritmo *DEM from vectors/points* (PCI OrthoEngine V 8.2.0), para los tamaños de celda de 1 m y de 10 m, no así con el de 5 m en el cual el RMSE es similar (12).

Un primer análisis permite apreciar que todos los modelos generados se ubican (basados en el RMSE obtenido para cada uno de ellos) -dentro de la clasificación propuesta por Schiwe (17)- como de alta exactitud, y uno de ellos (RMSE de 0,09 m) como de muy alta exactitud.

La densidad de acotamiento del terreno es la adecuada para la utilización de una equidistancia de 0,50 m, por lo que es necesario cotejar el error (RMSE) obtenido con lo recomendado por la bibliografía para esa densidad de acotamiento (vinculada a la equidistancia utilizada).

En el ámbito nacional

La Resolución 233 del VIII Congreso Nacional de Cartografía recomienda para trabajos expeditivos que el RMSE de los puntos de las curvas de nivel no deberá ser superior a 1/3 de la equidistancia (2) para asegurar que el 95% de los puntos estén exentos de error. Por otro lado, otros autores Jordan (6), Müller (11) y Firmenich (5) sostienen que el RMSE es igual a 1/6 de la equidistancia para asegurar, en este caso, que el 99% de los puntos estén exentos de error.

En el ámbito internacional

El United States Geological Survey (20) fija un estándar para los modelos digitales de elevación de nivel 3, como los aquí estudiados, aceptando como máximo RMSE permitido 1/3 de la equidistancia. Si se analizan los valores teóricos (según lo expuesto en los párrafos anteriores) y los calculados (consignados en la tabla 3, pág. 80), se advierte que:

RMSE teórico según el Centro Argentino de Cartografía (CAC) = $1/3 * \text{Equidistancia (0,50 m)} = 0,167 \text{ m}$

RMSE teórico según Jordan, Müller y Firmenich = $1/6 * \text{Equidistancia (0,50 m)} = 0,09 \text{ m}$

RMSE teórico según el U.S.G.S. = $1/3 * \text{Equidistancia (0,50 m)} = 0,167 \text{ m}$

Se comprueba que el RMSE calculado para el algoritmo *DEM from contour*, para los tres tamaños de grilla, se encuentra dentro del RMSE teórico propuesto por el CAC y por el USGS pero no así dentro del propuesto por Jordan (6), Müller (11) y Firmenich (5). Lo mismo ocurre con el algoritmo *DEM from vectors/points* para los tamaños de grilla de 5 m y 10 m, siendo el tamaño de 1 m de este algoritmo el que satisface todos los RMSE teóricos. En cuanto al análisis dentro de cada algoritmo, parece no haber diferencias significativas entre los tamaños de grilla estudiados.

Análisis estadístico

Para corroborar estas observaciones se procedió, a partir de las variancias muestrales, a la comparación de las variancias poblacionales utilizando el estadístico F de G. W. Snedecor (13). Se propuso una hipótesis nula (H0) de igualdad entre las

varianzas y una hipótesis alternativa (H1) de desigualdad; en consecuencia, para cada muestra de datos apareados se obtuvo:

S1 (varianza muestral DEM (curvas) - grilla 1 m) = 0,11 m
 S2 (varianza muestral DEM (puntos) - grilla 1 m) = 0,09 m
 Grados de libertad: 27 en ambos casos
 Nivel de significancia del 1% (0,01)

$$F \text{ (calculada)} = \frac{S1}{S2} = \frac{0,11 \text{ m}}{0,09 \text{ m}} = 1,22$$

$$F \text{ (de tabla)} = 2,47 \text{ (valor crítico)}$$

Como el valor calculado es inferior al valor crítico no existen suficientes evidencias para rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas, lo que demuestra que los tratamientos son equivalentes. Realizando el mismo cálculo para las restantes varianzas muestrales, se obtienen los siguientes datos (tabla 4):

Tabla 4. *F* de G. W. Snedecor.

Table 4. *F* of G. W. Snedecor.

	Varianzas muestrales		
	1 m	5 m	10 m
<i>F</i> calculada (S1/S2)	1,22	1,00	1,36
<i>F</i> de tabla (para 1% de significancia y 27 grados de libertad)	2,47 (^{27/27} y ^{0,01})		

Los datos indican que el valor calculado es inferior al valor crítico en todas las varianzas muestrales analizadas, lo que demuestra que los tratamientos son equivalentes para los dos algoritmos estudiados y para todos los tamaños de celda analizados.

Para verificar si existen diferencias significativas de las variaciones (en cada algoritmo) del RMSE en los tamaños de grilla estudiados, se utilizó el test de Duncan. Dicho test, basado en la amplitud total mínima significativa (shortest significant range), es utilizado para comparar el contraste entre la mayor y la menor de las medias. El test es exacto cuando el número de repeticiones es el mismo para todos los tratamientos (13):

$$D = z \frac{s}{\sqrt{r}}$$

z: es el valor de amplitud total mínima significativa al nivel del 5 % o del 1 % (obtenido de tabla)
 s: es el desvío estándar del error
 r: es el número de repeticiones

Luego, dicho valor D se compara con la diferencia entre la mayor y la menor de las medias a fin de establecer si existe diferencia significativa entre ellas.

Cabe señalar que si no hay diferencias significativas por el test de Duncan (entre la mayor y la menor), no se admiten diferencias significativas por el mismo test entre medias intermedias (13).

Se propuso una hipótesis nula (H_0) de igualdad entre las medias de los tres tratamientos (tamaño de grilla) estudiados para cada algoritmo y una hipótesis (H_1) de desigualdad. Se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 5):

Tabla 5. Test de Duncan.

Table 5. Duncan test.

	Grillas		
	1 m	5 m	10 m
Medias PCI Curvas	m1 = 0,070	m2 = 0,073	m3 = 0,108
Mayor-Menor	Media Mayor - Media menor = m3 - m1 = 0,108 - 0,070 = 0,038		
Duncan Calculado	Duncan Calculado = $D \left(\frac{3}{84} y 1\% \right) = 0,081$ 0,038 es menor que 0,081		
Medias PCI Puntos	m1 = 0,043	m2 = 0,065	m3 = 0,079
Mayor-Menor	Media Mayor - Media menor = m3 - m1 = 0,079 - 0,043 = 0,036		
Duncan Calculado	Duncan Calculado = $D \left(\frac{3}{84} y 0,01\% \right) = 0,071$ 0,036 es menor que 0,071		

Del análisis surge la validación de la hipótesis nula (H_0) de igualdad entre las medias de los tres tratamientos para los dos algoritmos estudiados.

CONCLUSIONES

Respecto del RMSE, el DEM generado a partir de puntos acotados del terreno como datos fuente y con el menor tamaño de grilla es el único que satisface los valores enumerados en la bibliografía, tanto nacional como internacional, lo que lo hace apto para proyectos relacionados con recursos naturales a nivel de ecotopo (predial). El resto de los DEMs generados presentan un RMSE que permite asegurar su aptitud para la evaluación de proyectos relacionados con el uso de los recursos naturales a nivel de unidad de paisaje (conjunto de ecotopos).

BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, J. M.; Mikhail, E. M. 1988. Introducción a la Topografía. McGraw-Hill. México. 753 p.
2. Centro Argentino de Cartografía. 1992. Boletín N° 1. Editorial del Centro Argentino de Cartografía. Buenos Aires. Argentina. 72 p.
3. Euillades, P. A.; Vénere, M. J.; Clausse, A.; Vives, L. 2003. Modelos de elevación de precisión y su importancia en la simulación de Inundaciones. IHLLA - Univ. Nac. del Centro Prov. de Buenos Aires. 8 p.

4. Felicísimo, A. M. 1994. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 49(4): 29-33.
5. Firmenich, V. 1985. Taquimetría a escala grande. Guía de trabajos prácticos de Topografía Agrícola. Centro de estudiantes - FAUBA. 53 p.
6. Jordan, W. 1961. Tratado General de Topografía. Editorial Gustavo Gili S. A. Barcelona. España. Tomos I y II p. 6-8 y 311-312.
7. Laureda, D. A.; Rosatto, H. G.; Solari, F. A.; Paolini, A. E.; Hourcade, M. D.; Álvarez, A. L.; Pascuet M. 1999. Error altimétrico en nivelación con estación total utilizando uno y tres prismas. *Agro Ciencia*, Chillan, Chile. 6 p.
8. Li, Z. 1991. Effects of check points on the reliability of DTM accuracy estimates obtained from experimental tests. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 47(10): 1333-1340.
9. Martínez Marín, R.; González Gámez, F.; Gordo Murillo, C. 2001. Análisis de las metodologías habituales para la generación de modelos digitales del terreno. *Mapping Interactivo*. 8 p. Artículo 71. Ed. Mapping, S. L. España.
10. Morillo Barragán, J.; Pozo Baselga, J.; Pérez Preciado, F.; Rodríguez Gordillo, M. C.; Rebollo Castillo, F. J. 2002. Análisis de calidad de un modelo digital de elevaciones generado con distintas técnicas de interpolación. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España. 12 p.
11. Müller, R. 1953. Taquimetría y confección de planos. Compendio general de Topografía teórico-práctica. Editorial El Ateneo, Buenos Aires. Argentina. Tomo III, Vol. 2. p. 167-168.
12. PCI Geomatics Orthoengine. 2003. <http://www.pcigeomatics.com>
13. Pimentel Gómez, F. 1978. Curso de Estadística Experimental. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires. Argentina. 323 p.
14. Rosatto, H. G. 1999. Curvas de nivel y delimitación de cuencas. Ayuda didáctica, editada por el Centro de Estudiantes de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. 9 p.
15. _____; Presutti, M.; Grau, C. A.; De Luca, E.; Solari, F. A.; Álvarez, A. L.; Lapido, M. 2005. DEM quality assesment by RMSE calculation in the altitude in areas with low to medium slopes. Congreso de la Unión Geográfica Internacional: "Environmental change and rational water use". Buenos Aires. Argentina. Proceedings of Commission for Water Sustainability of the International Geographical Union - Session 1: Management of surface and groundwater resources, p.19 R_A4101. Buenos Aires. Argentina.
16. Rossiter, D. G. ; Rodríguez, M. F. 1994. Construction of Digital Elevation Models for Land Evaluation. *Revista Venesuelos*. 2(1): 37-44.
17. Schiewe, J. 2000. Combining geometrical and semantical image information for the improvement of Digital Elevation Models. In: Buchroithner, M. F. (Ed.): *A Decade of Trans-European Remote Sensing cooperation*, Proceedings of the 20th EARSEL-Symposium, A. A. Balkema Publishers: 175:180.
18. Solari, F. A.; Rosatto, H. G.; Álvarez, A. L.; Barbosa, O. 2000. Precisión de dos métodos de digitalización y su influencia en la determinación de parámetros topográficos. II Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola. México. 10 p.
19. Torres Nieto, A.; Villate Bonilla, E. 2001. Topografía. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 460 p.
20. United States Geological Survey (USGS). 1998. Standards for digital elevation models. 410 p. National Mapping Program-EE.UU.
21. Yang, X.; Hodler, T. 2000. Visual and statistical comparisons of surface modeling techniques for point-based environmental data. *Cartography and Geographic Information Science*. 27(2): 165-175.